

Обґрунтовано доцільність і перспективність виробництва органічних добрив в гранульованому вигляді. Запропоновано в якості органічної суспензії використовувати рідкий курячий послід. Експериментально встановлено температурні режими процесу гранулювання курячого посліду та визначено робочий режим. Отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування рідкої фази суспензії

Ключові слова: гранулювання, апарат киплячого шару, органічна суспензія, курячий послід, температурний режим

Обоснована целесообразность и перспективность производства органических удобрений в гранулированном виде. Предложено в качестве органической суспензии использовать жидкий куриный помет. Экспериментально установлены температурные режимы процесса гранулирования куриного помета и определен рабочий режим. Получено критерияльное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к поверхности частиц при испарении жидкой фазы суспензии

Ключевые слова: гранулирование, аппарат кипящего слоя, органическая суспензия, куриный помет, температурный режим

УДК 661.152.4:66.096.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107169

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ОРГАНІЧНИХ СУСПЕНЗІЙ У КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Р. О. Острога

Кандидат технічних наук*

E-mail: r.ostroga@pohnp.sumdu.edu.ua

М. П. Юхименко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: yunp@ukr.net

С. І. Якушко

Кандидат технічних наук, доцент

А. Є. Артюхов

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: artyukhov@pohnp.sumdu.edu.ua

*Кафедра процесів та обладнання хімічних
і нафтопереробних виробництв
Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

1. Вступ

На сьогоднішній день проблеми з екологією стали одними з найбільш важливих в усьому світі. Екологічна чистота, насамперед продуктів харчування, стає найбільш актуальним питанням. Прийнято вважати, що найшкідливішими для харчування є генетично модифіковані продукти [1]. Проте небезпека модифікованих продуктів ще повністю не доведена і вчені до сих пір ведуть про це жваві суперечки. У той же час фахівці даної області впевнені, що найбільш шкідливими продуктами харчування для людини є ті, що вирощені із застосуванням великих доз мінеральних добрив та спеціальних стимуляторів росту. У таких овочах і фруктах скупчуються різні токсичні речовини, такі як сполуки свинцю та інших важких металів, ртуть, нітрати тощо [2].

Абсолютно усі пропоновані сьогодні мінеральні добрива містять у своєму складі не більше 50 % необхідних рослинам хімічних елементів, а інше є баластом, який також всмоктується рослинами. Зростаючі дози мінеральних солей знищують гумус, подрібнюють структуру

грунту, роблячи його більш щільним, холодним та малодоступним для повітря і вологи – усе це призводить до зменшення природної родючості.

У провідних країнах світу (США, Франція, Німеччина, Китай) активно розвивається і застосовується органічне землеробство. У 1980 році Міжнародною Федерацією Органічних Рухів Сільського господарства (IFOAM) були визначені Основні норми для Органічного Виробництва (IBS). До них, насамперед, відносяться такі: обробка земельних угідь, як мінімум, протягом трьох років повинна здійснюватися без застосування мінеральних добрив; заборонено використання гербіцидів, пестицидів, інсектицидів, азотомісних та інших хімічних добрив. При цьому в багатьох європейських країнах, таких як Італія, Франція, Німеччина, на державному рівні введені стандарти товарів Organic. Створено систему контролю виконання і дотримання цих стандартів [3].

У 2004 році обсяг ринку екологічної продукції в США досяг \$16 млрд., що становить 2 % від загального обсягу продажів продовольчих товарів. У Німеччині та Данії частка таких продуктів становить 3 %, а у Франції – лише

0,5 % [4]. Станом на початок 2009 р. в Україні нараховувалося 69 сертифікованих органічних господарств, а площа сільськогосподарських угідь під органічним виробництвом складала 239,5 тис. га. Це дало можливість Україні за цими показниками зайняти 16 місце у світі серед більш ніж 100 країн.

Сільськогосподарський потенціал України дуже високий, що дає можливість забезпечувати органічною продукцією як європейські, так і азіатські країни. Але при цьому слід пам'ятати, що пріоритетнішим завжди був і залишається внутрішній ринок.

Переваг органічних продуктів багато, починаючи від вживання більш поживної їжі до збереження ґрунту. Органічне сільське господарство опирається лише на органічні добрива і не використовує шкідливих хімічних речовин для збільшення врожайності. Така стратегія запобігає виснаження ґрунту, благотворно впливає на водне і повітряне живлення рослин, сприяє розвитку ґрунтових бактерій і мікроорганізмів, які допомагають рослинним культурам отримати доступні поживні елементи [5]. Близько 75 % органічних добрив від внесеної кількості мінералізуються і беруть участь у живленні рослин, а решта 25 % – гуміфікуються, тим самим заповнюючи втрати гумусу після обробки сільськогосподарських культур. Адже за рахунок рослинних залишків на зв'язкових ґрунтах відновлюється близько 50 %, на легких ґрунтах – близько 40 % втрат гумусу; вся інша кількість повинна бути відновлена за рахунок органічних добрив [6].

Найбільш поширеними органічними добривами в Україні є відходи тваринного походження (гній та птишиний послід), постійне накопичення яких призводить до забруднення навколишнього середовища. Загальний обсяг тваринницьких відходів приблизно у 10 разів більший порівняно з відходами побутової діяльності людини [7]. Тваринницькі комплекси забруднюють поверхневі водойми, підземні води й ґрунт. Внаслідок цього велика кількість біогенних елементів надходить у ці джерела. Тому існує необхідність розробки шляхів утилізації й раціонального використання відходів тваринництва. Адже залучення відходів господарської діяльності у біохімічний кругообіг сприяє, з одного боку, їхній утилізації, а з іншого, – розширенню сировинної бази для виробництва нових добрив.

Відходи тваринницького походження мають вигляд дуже зволжених суспензій. Фракційний склад твердих (зважених) частинок різноманітний і змінюється в залежності від виду і віку тварин, кормового раціону та попередньої обробки компонентів, що входять до його складу. Апарати з киплячим шаром добре зарекомендували себе як універсальне обладнання з високою питомою потужністю [8, 9]. Тому, щоб мінімізувати витрати на обробку вологих органічних речовин, для процесу гранулювання доцільно використовувати апарати даного типу. Ефективність такої гідродинамічної системи доведена рядом робіт, які присвячені теоретичним основам руху потоків в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами [10] та дослідженню їх екологічної безпечності [11]. Проведення процесу сушіння в зазначених апаратах з використанням активного гідродинамічного режиму, при якому забезпечується збільшення відносної швидкості руху взаємодіючих фаз, сприяє інтенсифікації процесу без зниження економічної ефективності роботи апарату. До переваг активного гідродинамічного режиму слід також віднести [12, 13]:

- гідродинамічну стійкість процесу;
- забезпечення розвиненої поверхні взаємодії контактуючих фаз;
- зменшення енергоємності процесу і металоємності апаратів.

Тваринницькі відходи мають природну липкість, завдяки чому відбувається гарне зчеплення, а отже не треба додатково вводити спеціальну хімічну речовину. У випадку використання в якості вихідної суспензії рідкого курячого посліду механізм формування та укрупнення гранул неоднозначний і істотно залежить від температурного режиму процесу гранулювання.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Теплообмінний процес при гранулюванні в апаратах киплячого шару відрізняється від сушіння тим, що на поверхню зважених гранул постійно подається суміш рідини та дрібних (10–20 мкм) органічних частинок. Інтенсивність теплообміну функціонально залежить від швидкості та температури повітря, розмірів частинок та їх фізико-хімічних властивостей [14, 15].

Найважливішим фактором, що визначає кінетику росту гранул, є характер взаємодії між краплями розчину і частками. Перша спроба аналізу контакту гранул з краплями розчину розглянуто в роботі [16]. Приймається допущення, що розчин повністю охоплює гранулу. Автор розраховував випаровування плівки розчину за умови суміщеного підведення тепла: кондукцією від гранули і конвекцією від псевдозріджуючого агента. Тобто відбувається вирішення спрощеної задачі теплообміну сфери з середовищем постійної температури. Отриманий результат має вигляд критеріальної залежності:

$$Nu_{\text{ЕФ}} = A \cdot \frac{2 \cdot \lambda_{\text{Г}}}{\lambda_{\text{Г}}} \cdot \frac{T_{\text{Р}} - T_{\text{Р+Δ}}}{T_{\text{ПШ}} - T_{\text{Р+Δ}}} \cdot Bi + B \cdot Nu_{\text{Нест}}, \quad (1)$$

де $\lambda_{\text{Г}}$, $\lambda_{\text{Г}}$ – теплопровідність твердого матеріалу і газу відповідно; $T_{\text{Р}}$, $T_{\text{Р+Δ}}$, $T_{\text{ПШ}}$ – температура поверхні гранули, плівки і шару відповідно; $Nu_{\text{ЕФ}}$, $Nu_{\text{Нест}}$ – значення критерію Нуссельта: ефективне та розраховане за рівнянням Нестеренко; Bi – критерій Біо; A , B – емпіричні константи.

У випадку, коли теплопровідністю всередині частинок знехтувати не можна, процес теплопереносу в об'ємі твердої кулястої частинки за умови, коли частки містять певну кількість вологи, запишеться у вигляді системи [17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{Г}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right] + \frac{\epsilon^* \cdot r_{\text{Г}}}{c_{\text{Г}}} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = k \cdot \left[\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right] + k \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (2)$$

де t – поточна температура частинки, °C; U – вологовміст матеріалу, кг/кг; τ – час, с; $a_{\text{Г}}$ – коефіцієнт теплопровідності твердої частинки, м²/с; r – поточний радіус частинки, м; ϵ^* – критерій фазового перетворення; $r_{\text{Г}}$ – питома теплота випаровування, Дж/кг; $c_{\text{Г}}$ – питома теплоємність твердої частинки, кДж/(кг·K); k – коефіцієнт теплопровідності; σ^* – термоградієнтний коефіцієнт переносу вологи.

Кінетика процесу сушіння твердих сферичних частинок, що описується системою диференціальних рів-

нянь (2), являє собою сполучену задачу тепломасопереносу. Подібне завдання в частині сушіння гранул у вихровому зваженому шарі було вирішено у роботі [18], де автором одержано закономірність розподілу температур за радіусом частинки та описано кінетику її зневоднення. Під час грануляції рідка фаза наноситься на поверхню гранул тонкою плівкою. Маючи достатню інтенсивність процесу сушіння, приймаємо, що випаровування вологи відбувається з поверхневого шару гранул, а отже, критерій фазового перетворення, градієнт вологовмісту і зміна вологовмісту у часі всередині гранули близькі до нуля.

Таким чином, диференціальне рівняння масопереносу всередині гранули втрачає сенс. Диференціальне рівняння теплопереносу у випадку, коли критерій фазового перетворення прагне до нуля, перетворюється в диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності. Для розв'язку останнього необхідно визначити значення встановлених констант, які, у свою чергу, залежать від величини критерію Біо [17]:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_T}, \quad (3)$$

де α – поверхневий коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); R – радіус частинки, м; λ_T – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Для визначення величини коефіцієнта тепловіддачі, який входить до складу рівняння (3), необхідно визначити явний вигляд функції $Nu = f(Re, Pr)$. Узагальнення експериментальних даних проводиться на основі функціональної залежності між критеріями теплової та гідродинамічної подібностей за допомогою загальновідомого рівняння конвективного теплообміну:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m. \quad (4)$$

Враховуючи, що фізичні параметри повітря будуть змінюватися у вузькому діапазоні, приймається $Nu \sim Pr^{0.33}$.

У наведеному критеріальному рівнянні (4) авторами [15, 19] визначені невідомі коефіцієнти A , n , m , проте безпосередньо їх використовувати для інших матеріалів або умов сушіння неможливо, бо це призводить до значних похибок у розрахунках. У роботі [20] авторами також було здійснено спробу визначити невідомі коефіцієнти з рівняння (4) для випадку зневоднення пористої аміачної селітри при нанесенні на неї додаткової оболонки. При цьому забезпечується оптимальний режим роботи обладнання, який характеризується мінімальними витратами енергії для видалення фіксованої кількості вологи. Застосування запропонованої авторами методики визначення коефіцієнтів для моделювання процесу гранулювання органічних суспензій є прийнятною для випадку, який розглядається. Такий підхід відповідає сучасним поглядам на теоретичний опис процесу зневоднення, що описані в роботах у галузі гранулювання і сушіння [21, 22].

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є дослідження механізму утворення гранульованих добрив шляхом зневоднення органічних суспензій у киплячому шарі, а також встановлення тем-

пературних режимів гранулювання. Це надасть можливість удосконалити технологію виробництва органічних добрив і безперервно отримувати багатошаровий продукт заданої міцності та щільності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити механізм гранулоутворення в апараті киплячого шару;
- експериментально встановити температурні режими грануляції суспензії курячого посліду в киплячому шарі;
- запропонувати апаратне оформлення лінії виробництва гранульованих органічних добрив для вирощування екологічно чистих продуктів харчування.

4. Дослідження процесу гранулювання органічних суспензій у киплячому шарі

4.1. Механізм гранулоутворення у киплячому шарі

Ефективність процесу гранулювання залежить від механізму гранулоутворення, який визначається специфікою суспензії, способом гранулювання та його апаратним оформленням. Гранулювання методом диспергування суспензії у киплячому шарі полягає в імпульсному нанесенні на поверхню твердих частинок тонких плівок і випаровуванні рідини за рахунок тепла, що підводиться ззовні. Вода або розчин випаровується, а утворений шар сухої речовини збільшує діаметр гранули. Значне збільшення розміру гранул відбувається протягом багатьох таких циклів. Для гранулювання створюється зона киплячих гранул заввишки 150–200 мм, яка обмежена газорозподільною решіткою (знизу) та стінками апарата (з боків). Зверху – вільний простір: гранули підіймаються на деяку висоту і знову опускаються в шар.

Розпилення суспензії в шар киплячих гранул відбувається за допомогою пневматичної форсунки (рис. 1), до якої підведене стиснене повітря і рідкий курячий послід. У форсунці за допомогою компресора підтримувався тиск в межах 4–6 атмосфери, що забезпечувало створення якісної зони зрошення у шарі зважених гранул.

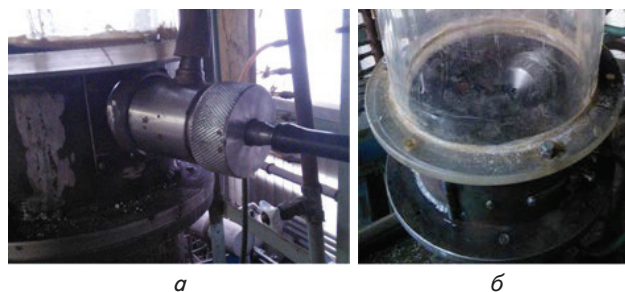


Рис. 1. Місце розташування пневматичної форсунки: а – вигляд ззовні; б – вигляд зсередини

Стиснене повітря захоплює суспензію і розпилює її в шар гранул, утворюючи в ньому порожнину, куди і подається розпил. Отже, киплячий шар гранул умовно можна розділити на дві зони: у першій зоні відбувається сушіння гранул, а у другій – гранули покриваються плівкою суспензії.

Залежно від особливостей процесу, зокрема від механізму гранулоутворення, на розмір гранул різні параметри впливають не однаковою мірою або зовсім не впливають. Так, швидкість псевдозрідження та середній час перебу-

вання продукту в шарі не впливають на розмір гранул в умовах безперервного процесу. Однак при тепловому дробленні, зі зменшенням часу перебування продуктів у шарі, джерело утворення нових частинок зменшується. Також зі зменшенням швидкості зріджуючого агента погіршується інтенсивність перемішування зернистого шару. Усе це зменшує число циклів нагрівання та охолодження, що призводить до зростання діаметра гранул.

Таким чином, вплив технологічних параметрів процесу на гранулометричний склад продукту зводиться до регулювання кількості дрібної фракції, що утворюється в шарі. Цілком очевидно, що для підтримки оптимальних показників процесу гранулювання різних речовин потрібні різні режими гранулювання [23].

У залежності від співвідношення часу розтікання краплі суспензії буде змінюватись і характер гранулоутворення: при дуже швидкому підведенні тепла рідина видаляється з краплі, яка ще не встигла повною мірою розтектися по поверхні гранули. По мірі зменшення кількості теплоти, що підводиться до краплі, остання розтікається по все більшій поверхні, аж поки не покриє всю гранулу. При нестачі тепла для випаровування краплі суспензії гранула залишається вологою. Очевидно, що характер гранулоутворення залежить не тільки від швидкості видалення вологи, але і від швидкості розтікання плівки, яка, у свою чергу, визначається властивостями суспензії та поверхні гранули.

Слід зазначити, що висновки, отримані на підставі аналізу взаємодії одиничних крапель і гранул, не дають однозначного пояснення закономірностей росту гранул в псевдозрідженому шарі. У реальному процесі ця взаємодія ускладнюється можливістю одночасного контакту гранули з декількома краплями, попадання деяких крапель суспензії з однієї гранули на іншу при їх безпосередньому зіткненні та терті, обертання гранули тощо.

У результаті проведення лабораторних досліджень встановлено, що у разі використання в якості вихідної суспензії рідкого курячого посліду механізм росту гранул не завжди відповідає гіпотезі рівномірно-поверхневого, так званого «нормального», зростання. Тобто не можна апіорно приймати рівномірне розтікання плівки по поверхні гранули [24].

4. 2. Характеристика курячого посліду

Курячий послід – це концентрована органічна речовина, що містить основні поживні елементи (табл. 1). Окрім органічної речовини до його складу входить також азот, фосфор і калій – макроелементи, які так необхідні рослинам. Крім цих основних елементів живлення у тваринницьких відходах також містяться сірка, магній, кальцій та група мікроелементів (марганець, цинк, мідь, залізо, молібден, кобальт тощо).

Таблиця 1

Хімічний склад курячого посліду (% на сиру речовину)

Вода (H ₂ O)	Азот (N)	Фосфор (P ₂ O ₅)	Калій (K ₂ O)	Кальцій (CaO)	Магній	Сірка
53–57	0,7–1,9	1,6–2,0	0,8–1,0	2,4	0,7	0,4

Курячий послід використовується як швидко- і сильнодіюче добриво, оскільки поживні речовини в ньому знаходяться у легкодоступній для рослин формі. Кислотність курячого посліду залежить від віку та раціону

харчування птахів і знаходиться в діапазоні помірно-лужного рН (6,5–8,0), що робить його придатним для використання практично на всіх типах ґрунтів [6].

4. 3. Температурні режими процесу гранулювання суспензії курячого посліду

Утворення твердих частинок необхідного розміру при гранулюванні суспензії курячого посліду у киплячому шарі відбувається або одночасно, або поступово. У залежності від різниці температур між прирешітоною зоною та зоною введення суспензії можна виділити температурні режими приросту гранул (рис. 2). Тому розрізняють процеси гранулювання, що протікають без зміни розмірів частинок у часі (рис. 2, в), зі зміною розміру частинок у часі (рис. 2, а) та з укрупненням наявних частинок і утворенням нових центрів грануляції (рис. 2, б).

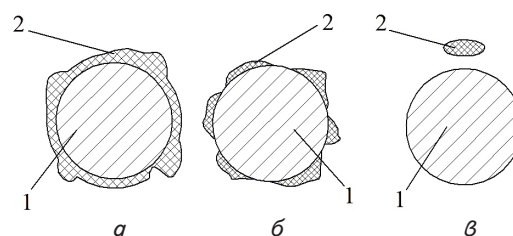


Рис. 2. Режими приросту гранул:

а – оболонковий; б – оболонковий з тріщинами; в – з утворенням нових центрів грануляції; 1 – органічне ядро; 2 – зневоднена складова суспензії

У процесі лабораторних досліджень температура під газорозподільною решіткою регулювалася в межах 50–100 °С, при цьому температура повітря в шарі гранул становила 40–80 °С. Таке падіння температури пояснюється тим, що у шар киплячих гранул постійно вводиться волога суспензія, яка, випаровуючись, відбирає тепло. Отже, змінюючи температуру повітря під решіткою, можна регулювати проходження процесу.

На рис. 3 наведено зрізи гранул, які отримані за температур 70–80 °С, що відповідають оболонковому режиму з тріщинами.

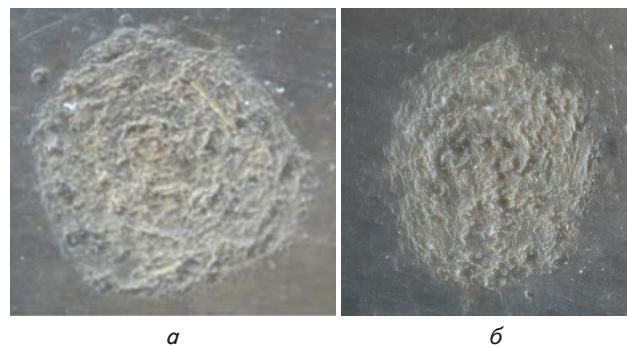


Рис. 3. Зрізи гранул (збільшення в 20 разів), що одержані при температурі: а – 70 °С; б – 80 °С

По представленим на рис. 3 зрізам видно, що гранули, які отримано при температурі 70 °С (рис. 3, а), характеризуються більш щільною структурою. Це забезпечує пролонгованість дії отриманого продукту, оскільки динаміка руйнування частинки напряму залежить від того, з якою швидкістю волога дифундує всередину гранули.

4. 4. Теплообмін процесу гранулювання суспензії курячого посліду. Узагальнення результатів

На підставі отриманих експериментальних значень проводили розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування суспензії за рівнянням тепловіддачі.

Вимірювання температури повітря в зернистому шарі матеріалу здійснювалось за допомогою самописного потенціометра типу КСП-4 (точність вимірювання $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Датчики термопар виконані у вигляді термометричних трубок діаметром 2 мм і довжиною 60 мм, на кінцях яких знаходиться спай з хромелевої та капелевої дрітків діаметром 0,1 мм. Теплоємність даної термопари дуже мала, що дозволяє проводити вимірювання в умовах змінних температур протягом дослідів. У кожному досліді також вимірювалися початкова та кінцева температури сушильного агента.

В експериментальних умовах критерій Біо знаходиться в межах $0,15 < Bi < 0,3$. Згідно рекомендацій [17] задачу теплопереносу слід вважати зовнішньою. Це означає, що температура частинки по об'єму однакова і весь термічний опір зосереджено зовні частинки.

Також слід враховувати, що температура шару вимірювалася відкритими спаями термопар, які фіксували проміжне значення між температурами твердих частинок і сушильного агента.

Таким чином, розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі є не істинними, а «ефективними». Дослідні дані представляли згідно традиційним рекомендаціям у вигляді рівняння (4).

Абсолютні значення швидкостей твердих частинок малі у порівнянні зі швидкістю сушильного агента. Співвідношення між швидкістю газового потоку у вільному перерізі апарата і швидкістю потоку в шарі між частинками змінюється. Це відбувається як по перетину, так і по висоті шару, та сильно залежить від гідродинамічного режиму зважування твердої фази. Отже при визначенні критерію Рейнольдса враховували усереднену швидкість сушильного агента.

Для розрахунку температури суспензії на поверхні частинок отримана наступна залежність:

$$t_c = \frac{G_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot (t_{\Pi 1} - t_{\Pi 2}) - G_{\text{випс}} \cdot r}{G_C \cdot c_C} + t_{C0}, \quad (5)$$

де G_{Π} – масова витрата повітря, кг/с; c_{Π} – теплоємність повітря, Дж/(кг·К); $t_{\Pi 1}$ – температура повітря під газорозподільною решіткою, $^\circ\text{C}$; $t_{\Pi 2}$ – температура повітря на виході з робочої зони апарата, $^\circ\text{C}$; $G_{\text{випс}}$ – масова витрата води (води), що випаровується, кг/с; r – питома теплота випаровування води, Дж/кг; G_C – масова витрата суспензії, кг/с; c_C – теплоємність суспензії, Дж/(кг·К); t_{C0} – початкова температура суспензії, $^\circ\text{C}$.

Якщо припустити, що температура поверхні твердих частинок дорівнює температурі суспензії на їх поверхні, то маємо змогу побудувати залежність усередненого коефіцієнта тепловіддачі від дійсної швидкості псевдозріджуючого повітря (рис. 4).

У даному випадку, оскільки фізичні параметри повітря змінюються у вузькому діапазоні, коефіцієнт $m=0,33$. Невідомі коефіцієнти A, n визначаємо шляхом представлення експериментальних значень в системі координат з логарифмічним масштабом шкал.

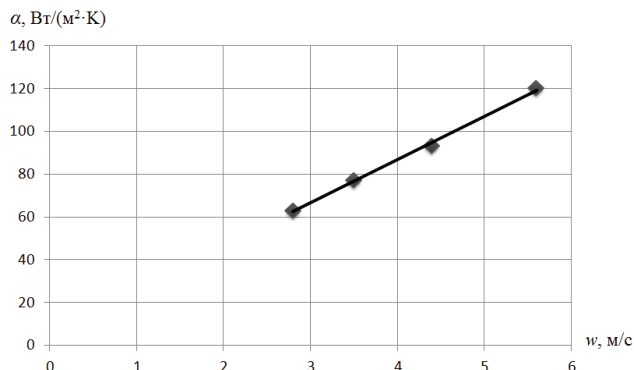


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості псевдозріджуючого повітря при випаровуванні суспензії курячого посліду з поверхні гранул

Підставивши значення визначених коефіцієнтів у рівняння (4), отримуємо:

$$Nu = 0,04 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,33}. \quad (6)$$

За допомогою рівняння (6) маємо змогу розраховувати значення коефіцієнтів тепловіддачі для процесу гранулювання суспензії курячого посліду з точністю $\pm 8,4\%$.

5. Розробка апаратурного оформлення лінії виробництва гранульованих органічних добрив

Послід птахів у великій кількості містить патогенну та умовно-патогенну мікрофлору та яйця гельмінтів. Крім того, необроблений послід може бути фактором передачі інфекційних і паразитарних захворювань (бруцельоз, туберкульоз тощо). Саме тому пташиний послід віднесений до III класу небезпеки. Тому перш ніж його використовувати в якості добрива слід провести стадію підготовки (переробки) [23].

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблено установку виробництва гранульованих органічних добрив, яка враховує фізико-хімічні особливості використовуваних речовин. Модель такої пілотної установки представлена на рис. 5.

Установка працює наступним чином. Попередньо, вихідна суспензія проходить стадію подрібнення. Курячий послід потрапляє в робочу зону дискового млина. Під дією зрізуючих та розтягуючих сил відбувається руйнування (перетирання) твердих дисперсних включень корму, соломи тощо.

Подрібнена гомогенна маса проходить стадію знезараження в кавітаторі. Під дією електромагнітних сил в оброблюваній суспензії йде зародження гідродинамічних коливань, які призводять до виникнення парогозових бульбашок – виникає явище кавітації. Це явище супроводжується різким локальним підвищенням температури та виникненням ударних хвиль. Утворені процеси призводять до незворотних біохімічних процесів у мікроорганізмах на клітинному рівні.

Далі, за допомогою фекального насоса, рідкий курячий послід потрапляє в мірний бачок, який оснащений перемішувачем пристроєм, а звідти – самопливом у насос-дозатор.

Безпосередньо процес формування гранул відбувається в робочій камері апарата киплячого шару. На газорозподільну решітку апарата вноситься, так звана,

затравка. Під газорозподільну решітку, через калорифер, подається гаряче повітря у кількості, що забезпечує стійкий зважений шар гранул. На пневматичну форсунку дозовано поступає органічна маса, розпилення якої здійснюється за допомогою компресора. Нові органічні центри грануляції утворюються безпосередньо із суспензії, а також за рахунок сколювання окремих частинок з поверхонь більших гранул.

З рівня решітки організовується постійний відбір гранул, які потрапляють в пневматичний класифікатор. В останньому, за допомогою газодувки, відбувається процес пневмосепарації: дрібні гранули (розміром менше 2 мм) по трубопроводу повертаються у киплячий шар на дорошування, а гранули товарного розміру (2–5 мм) – виводяться з процесу і накопичуються в збірнику.

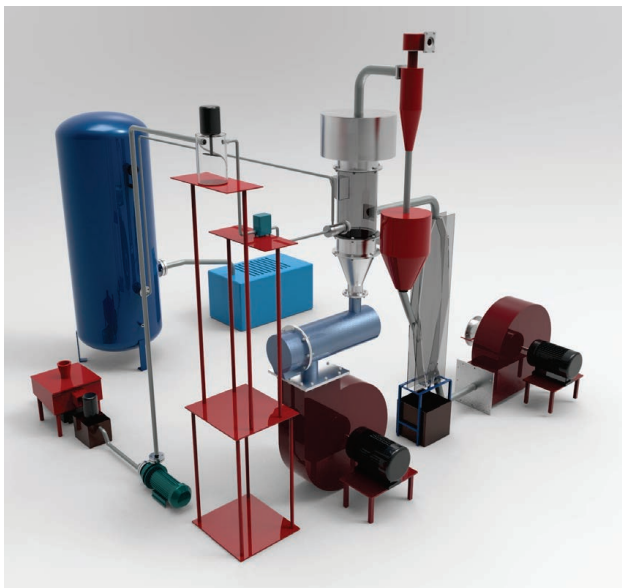


Рис. 5. Модель пілотної установки гранулювання органічних добрив

Екологічність роботи установки забезпечується роботою циклона, в якому відбувається очищення відпрацьованого повітря: частинки пилу накопичуються у збірнику, а очищене повітря виводиться за межі установки або виробничого приміщення.

6. Обговорення результатів дослідження впливу температурних режимів гранулювання на процес формування органічних гранул

Дослідним шляхом встановлено, що якщо температуру повітря у шарі киплячих гранул підтримувати в межах 70–80 °С, то одночасно протікають два процеси – йде наросування (укрупнення) гранул, а також за рахунок сколювання утворюється певна кількість дрібних частинок. Цей температурний режим відповідає оболонковому з тріщинами (рис. 2, б) і є робочим для отримання гранульо-

ваних органічних добрив. Такий температурний діапазон також сприяє безперервній роботі установки протягом тривалого часу з постійним утворенням товарних гранул.

При температурі зернистого шару 70 °С краплі суспензії розтікаються по поверхні гранул і починає інтенсивно випаровуватися рідина. Новостворена органічна поверхня порита тріщинами і неміцно прилягає до гранули (рис. 3, а) – це супроводжується сколюванням органічної речовини в окремих місцях гранули і йде утворення нових органічних центрів грануляції (зворотні процеси). Але паралельно із цим протікають і прямі процеси, що спрямовані на збільшення розмірів частинок.

При підвищенні температури до 80 °С відбувається ще більш інтенсивне кипіння суспензії – волога, випаровуючись, утворює ще більші місцеві вириви у вигляді тріщин на поверхні гранули (рис. 3, б). За рахунок наявних тріщин волога швидше і легше потрапляє усередину гранули, розчиняє та відокремлює органічні зв'язки. Така гранула характеризується меншою статичною міцністю та значно меншим часом розчинення у ґрунті.

Отже, у встановленому робочому температурному діапазоні (70–80 °С), слід дотримуватися нижнього значення температур. У результаті отримаємо багаточастинкові гранули високої щільності і міцності.

7. Висновки

1. Досліджено механізм гранулоутворення в апараті киплячого шару та встановлено вплив температури на гранулометричний склад кінцевого продукту. При температурі в шарі зважених гранул 70 °С маємо можливість безперервно отримувати органічні гранули високої щільності та міцності.

2. Отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до поверхні частинок під час випаровування суспензії курячого посліду. Це рівняння дозволяє прогнозувати темп зростання інтенсивності теплообміну при збільшенні швидкості повітряного потоку під час гранулювання у киплячому шарі, що дає змогу визначити оптимальні витрати сушильного агента.

3. Запропоновано апаратне оформлення лінії виробництва гранульованих органічних добрив для вирощування екологічно чистих продуктів харчування. Розроблена технологія враховує специфічні властивості сирого курячого посліду, а саме: підвищену вологість і липкість, наявність життєздатних організмів, насіння бур'янів тощо.

Подяки

Дослідження проводилось у рамках проекту «Підвищення ефективності грануляторів і сушарок з активними гідродинамічними режимами для отримання, модифікації і капсулювання добрив» (номер державної реєстрації 0116U006812).

Література

1. Verma, C. A Review on Impacts of Genetically Modified Food on Human Health [Text] / C. Verma // The Open Nutraceuticals Journal. – 2011. – Vol. 4, Issue 1. – P. 3–11. doi: 10.2174/1876396001104010003

2. Balezentiene, L. Effect of organic and mineral fertilizers and land management on soil enzyme activities [Text] / L. Balezentiene, E. Klimas // *Agronomy Research*. – 2009. – Vol. 7, Issue 1. – P. 191–197.
3. Morgera, E. Organic agriculture and the law [Text] / E. Morgera, C. B. Caro, G. M. Duran. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. – 306 p.
4. Panitchpakdi, S. Food safety and environmental requirements in export markets – friend or foe for producers of fruit and vegetables in asian developing countries? [Text] / S. Panitchpakdi. – New York and Geneva: United Nations, 2007. – 120 p.
5. Scialabbe, N. Organic agriculture and climate change [Text] / N. Scialabbe, M. Muller-Lindenlauf // *Renewable Agriculture and Food Systems*. – 2010. – Vol. 25, Issue 2. – P. 158–169.
6. Arifin, B. The transformation of chicken manure into mineralized organic fertilizer [Text] / B. Arifin, A. Bono, J. Janaun // *Journal of Sustainability Science and Management*. – 2006. – Vol. 1. – P. 58–63.
7. Писаренко, В. В. Відходи тваринництва впливають на довкілля [Текст] / В. В. Писаренко, П. В. Писаренко // *Фермерське господарство*. – 2010. – № 20 (484). – С. 14–15.
8. Volchkov, E. P. Investigation of the flow in the vortex chamber with centrifugal fluidizing bed with and without combustion [Text] / E. P. Volchkov, N. A. Dvornikov, V. V. Lukashov, R. Kh. Abdrakhmanov // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2013. – Vol. 20, Issue 6. – P. 663–668. doi: 10.1134/s0869864313060024
9. Dvornikov, N. A. Investigation of a fluidized bed in a vortex chamber [Text] / N. A. Dvornikov, P. P. Belousov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2011. – Vol. 52, Issue 2. – P. 206–211. doi: 10.1134/s0021894411020076
10. Artyukhov, A. Theoretical Analysis of Granules Movement Hydrodynamics in the Vortex Granulators of Ammonium Nitrate and Carbamide Production [Text] / A. Artyukhov, V. Sklabinskyi // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2015. – Vol. 9, Issue 2. – P. 175–180. doi: 10.23939/chcht09.02.175
11. Artyukhov, A. E. Experimental and industrial implementation of porous ammonium nitrate producing process in vortex granulators [Text] / A. E. Artyukhov, V. I. Sklabinskyi // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2013. – Issue 6. – P. 42–48.
12. Kaewklum, R. Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor [Text] / R. Kaewklum, V. I. Kuprianov // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89, Issue 1. – P. 43–52. doi: 10.1016/j.fuel.2009.07.027
13. Ashcraft, R. W. Modeling fast biomass pyrolysis in a gas–solid vortex reactor [Text] / R. W. Ashcraft, G. J. Heynderickx, G. B. Marin // *Chemical Engineering Journal*. – 2012. – Vol. 207–208. – P. 195–208. doi: 10.1016/j.cej.2012.06.048
14. Caiyuan, Y. Heat and mass transfer in process of fluidized bed spray granulation [Text] / Y. Caiyuan, Q. Tao, W. Xizhong // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2004. – Vol. 16, Issue 6. – P. 836–839.
15. Нагурський, О. А. Експериментальні дослідження теплообміну під час капсулювання дисперсних матеріалів в залежності від швидкості теплоносія [Текст] / О. А. Нагурський // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2011. – № 3. – С. 105–109.
16. Волков, В. Ф. Тепломассоперенос при грануляции и сушке растворов в псевдооживленном слое [Текст] / В. Ф. Волков, И. И. Шишко, Л. В. Хохлова // *Тепло- и массоперенос*. – 1968. – Т. 5. – С. 248–251.
17. Юхименко, М. П. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок [Текст] / М. П. Юхименко, С. В. Вакал, М. П. Кононенко, А. П. Філонов. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
18. Artyukhov, A. E. Kinetics of heating and drying of porous ammonium nitrate granules in the vortex granulator [Text] / A. E. Artyukhov // *2016 International Conference on Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. – 2016. doi: 10.1109/nan.2016.7757297
19. Барна, І. Р. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію [Текст] / І. Р. Барна, В. М. Атаманюк // *Хімічна промисловість України*. – 2012. – № 3. – С. 21–27.
20. Artyukhov, A. E. Thermodynamic Conditions for Obtaining 3D Nanostructured Porous Surface Layer on the Granules of Ammonium Nitrate [Text] / A. E. Artyukhov, V. I. Sklabinskyi // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2016. – Vol. 8, Issue 4 (2). – P. 04083-1–04083-5. doi: 10.21272/jnep.8(4(2)).04083
21. Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology [Text] / D. Parikh (Ed.). – Informa Healthcare, 2009. – 676 p.
22. Solanki, H. K. Recent advances in granulation technology [Text] / H. K. Solanki, T. Basuri, J. H. Thakkar, C. A. Patel // *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. – 2010. – Vol. 5, Issue 3. – P. 48–54.
23. Ostroha, R. Technology of producing granular fertilizers on the organic basis [Text] / R. Ostroha, M. Yukhymenko, Ya. Mikhajlovskiy, A. Litvinenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 1, Issue 6 (79). – P. 19–26. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60314
24. Yukhymenko, M. Hydrodynamic and kinetic processes of the mineral fertilizer granules encapsulating in the multistage device with suspended layer [Text] / M. Yukhymenko, R. Ostroga, A. Artyukhov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6, Issue 6 (84). – P. 22–28. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84179